
doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.033>

УДК 669.295; 621.01; 621.762. 07

А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич

Государственный национальный университет «Институт порошковой металлургии»,
Минск, Республика Беларусь

ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В БЕЛАРУСИ, ПОРОШКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДЛЯ НИХ

Представлено собственное видение авторов места аддитивных технологий в современном производстве, их отношение к методам и технологиям традиционной порошковой металлургии, к возможностям их совместного использования. Приведены результаты оригинальных разработок в Республике Беларусь в начале 21 века установок селективного лазерного спекания порошков металлов и технологий получения из них пористых и композиционных материалов из порошков титана и титановых сплавов. Описаны особенности установки селективного лазерного плавления и установки получения порошков индукционной плавкой в вакууме с распылением струи расплава инертным газом, введенные в эксплуатацию в ГНУ «Институт порошковой металлургии». Предложены перспективные направления НИР и ОТР на новом оборудовании.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное спекание, селективное лазерное плавление, горячее изостатическое прессование, индукционная плавка в вакууме, распыление струи расплава инертным газом.

ВВЕДЕНИЕ

В стандарте ASTM F2792.15493231 приведено определение аддитивных технологий: Additive Manufacturing — the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies — процесс объединения материала для создания объекта на базе данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от «вычитающих» производственных технологий. В данном определении три ключевых момента: соединение материала; компьютерная 3D-модель; отличие от технологий обработки металлов резанием, под которыми понимаются «вычитающие» технологии. Послойное формование использовано с определением «как правило», т. е. может быть и не обязательным. Таким образом,

технологии соединения дисперсных компонентов в готовое изделие в одном процессе являются по определению аддитивными.

Тенденции развития современной промышленности в передовых странах мира показывают ее три главных опоры [9]: новые специальные материалы с заданными свойствами; технологии их обработки, прежде всего аддитивные; неразрушающие методы контроля. Промышленные роботы, станки с ЧПУ, АСУ ТП, АСУП и даже микроэлектроника, представляющие основу пятого технологического уклада, фактически уступают место принципиально новым технологиям — аддитивным, которые вместе с нанoeлектроникой, оптоинформатикой, фотоникой, био-, CALS-технологиями, системами искусственного интеллекта и др. составят ядро шестого технологического уклада, определяют будущее науки и промышленности во всем мире [9].

© А. Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, В. В. САВИЧ, 2017

Целью данной работы является оценка места аддитивных технологий в современном производстве и роли ученых и специалистов в процессе разработки и освоения данных технологий, в том числе и в Беларуси.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ВИДЫ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аддитивные технологии (или в общепринятой мировой транскрипции Additive Manufacturing – AM) — понятие очень широкое, которое охватывает и многие традиционные промышленные технологии, история которых насчитывает не одно десятилетие [1, 3–5, 10, 11]. К ним можно отнести: получение полупроводниковых гетероструктур методами молекулярно-лучевой эпи-

таксии и CVD — химического осаждения из газовой фазы (1960-е годы); офсетная печать (известна с XVIII века); нанесение многослойных покрытий на изделия газотермическими методами, PVD, CVD; возведение каменных и кирпичных стен; получение сварных трехмерных конструкций и др.

В современных аддитивных технологиях главная роль отведена компьютерному моделированию трехмерных деталей любой сложности и их формированию слой за слоем с помощью автоматических систем.

У истоков современного аддитивного производства стояла стереолитография. Она использовала подход, который придумал Отто Джон Мюнц в 1951 г. В установке Мюнца поршень в цилиндре смещался на маленькое расстояние и освобождал пространство для слоя, которое заполняли светочувствительным полимером. Затем полимер облучали светом так, что он застывал только на определенном участке. Следующее движение поршня — еще один слой, еще один цикл отверждения. В результате из многих слоев получалась объемная полимерная модель. Это был ключевой принцип, который лег в основу современной стереолитографии (SL). В 1984 г. Чарльз Халл запатентовал технологию и основал компанию 3D Systems, которая в 1986 г. начала промышленное использование стереолитографии. В 1985 г. появляется технология ламинирования LOM (Laminated Object Manufacturing), в 1986 г. — технология послойного наплавления FDM (Fused Deposition Modeling). Уже в 1990-х аддитивные технологии с использованием нагрева лазерным и электронным лучом частиц порошков металлов для получения трехмерных объектов — металлургические AM стали частью мирового производства.

Первые технологии создания трехмерных объектов называли «быстрым прототипированием». В 1995 г. Массачусетским технологическим институтом был предложен термин «3D-Printing». Однако 3D-печать — лишь часть аддитивных технологий.

В табл. 1 [1, 7] представлен доработанный нами перечень технологий аддитивного производства и материалы, которые они используют.

Таблица 1. Основные виды аддитивных технологий

Состояние сырья	Вид материала	Процесс
Жидкое	Полимеры	Стереолитография (SL) Послойная наплавка (FDM) Струйная печать (IJP)
Дисперсное	Полимеры, металлы, керамика и их комбинация	Селективное лазерное спекание (SLS) Прямое лазерное спекание металлов (DMLS) Селективное лазерное сплавление (SLM) 3D-принтинг (3DP)
	Металлы	Электронно-лучевое сплавление (EBM) Прямое нанесение (DMD) Точное лазерное формование (LENS) Газотермическое напыление (SS)
Твердое	Полимеры, металлы, композиты	Послойное соединение листового материала (LOM)
		Экструзионное формование (EFF)

ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Металлургические АМ можно разделить по методу формирования слоя на два основных направления:

1. Технология «Bed Deposition», которую реализуют компании-производители АМ-машин: 3D Systems (SLS, SLA), EOS (DMLS), Envisiontec (DLP), SLM Solutions (SLM), Realizer (SLM), ExOne (Ink-Jet), Renishaw (SLM), Voxeljet (Ink-Jet), Concept Laser (Laser CUSING) [6, 11].

В данной технологии сначала насыпают слой порошкового материала на поверхность рабочей платформы и разравнивают порошок с помощью ролика или «ножа», формируя ровный слой материала определенной толщины. Затем выборочно обрабатывают порошок в сформированном слое лазерным лучом («селективное лазерное спекание» (SLS — Selective Laser Sintering), или иным способом, скрепляя частички порошка. Кроме SLS- и SLA-технологий, к Bed Deposition относят такие известные технологии, как: SLM — Selective Laser Melting (компания SLM Solutions, Германия); DMLS — Direct Metal Laser Sintering (компания EOS, Германия); EBM — Electron Beam Melting (компания Arcam, Швеция); Laser Cusing (компания Concept Laser, Германия); SPLS — Solid Phase Laser Sintering.

2. Технология «Direct Deposition» (DED) — прямой энергетический метод наплавки, которую реализуют компании-производители машин: Optomec (LENS), POM Group (DMD), Trumpf (DLF), Objet (Poly-Jet), Stratasys (FDM, DoD), 3D Systems (MultiJet) [6, 11].

Этот процесс для металлических порошков обозначается как (Direct Metal Deposition (DMD) — прямое (непосредственное) нанесение металлов. Через сопло в зону плавления подается порошковый материал, который расплавляется лучом лазера, а металл после охлаждения формирует слой детали. При данной технологии происходит направление энергии и осаждение материала в конкретной локальной области. Эта технология характеризуется более высокой производительностью, чем селективное лазерное плавление, а также возможностью изготовления крупных

изделий, однако этим методом невозможно создать сетчатые структуры и внутренние каналы в деталях.

Металлургические АМ имеют следующие достоинства:

- практически неограниченный дизайн конечного изделия по сравнению с традиционными технологиями литья, обработки давлением и механической обработки;
- малый вес конечного изделия благодаря доступной каркасной структуре или ячеистой конструкции отдельных частей изделия с наличием материала только в наиболее нагруженных местах;
- наличие новых функций изделия благодаря сложной системе внутренних каналов, используемых для функционирования изделия, его охлаждения или объединения множества отдельных частей в одно цельное изделие, замещающее ранее сборную конструкцию цельной;
- минимальное использование сырья (в разы меньше по сравнению с механической обработкой заготовок из проката, поковок или отливок), что особенно важно в случае использования дорогостоящих или труднообрабатываемых металлов и сплавов, а также позволяет создавать сложные по конструкции детали в один этап, сокращая количество сборочных операций, таких как сварка, пайка, запрессовка и т. п.;
- отсутствие специальных формообразующих инструментов, свойственных традиционным процессам металлургии и обработки давлением — пресс-форм, литейных форм, кузнечных штампов и т. п.;
- относительно краткое время производственного цикла: изделия сложной формы и точных размеров могут быть изготовлены из порошков металлов и сплавов слой за слоем в течение нескольких часов с помощью оборудования АМ (полное время цикла может достигать нескольких часов или суток, но это в любом случае намного короче, чем при традиционных процессах, производственный цикл которых — заготовительные операции, литейные, кузнечные, термообработка, механическая обработка и т. п. — часто достигает нескольких недель и даже месяцев);
- относительно малая энергоемкость процесса — несмотря на большую установленную мощность

металлургических установок АМ, системы лазерного сплавления частиц порошка локализуют энергию в малой зоне, и такие установки в целом потребляют фактически меньше, чем линейка литейного или кузнечно-прессового оборудования с металлорежущими станками, необходимыми для получения изделия традиционным путем.

Металлургические АМ позволяют применять новые высокоэффективные материалы, новые методы управления и, таким образом, обуславливают новое функциональное и интеллектуальное содержание готового продукта. АМ являются не только современными и высокоэффективными, но инновационными по своей сути, поскольку сами позволяют генерировать новые технологии и несут в себе новое качество. Их с полным основанием относят к технологиям XXI века. Кроме указанных выше преимуществ, эти технологии имеют важное достоинство с точки зрения охраны окружающей среды.

Металлургические АМ имеют и некоторые ограничения. Это в первую очередь габариты детали. При использовании АМ-технологии они ограничены размером платформы оборудования. Например, для большинства платформ характерны размеры $250 \times 250 \times 250$ или $300 \times 250 \times 250$ мм. Появились сведения о создании фирмой Concept Laser установки Xline 1000R с размерами рабочей зоны $630 \times 400 \times 500$ мм, а фирмой SLM Solution — установки SLM 500 с размерами рабочей зоны $500 \times 280 \times 350$ мм [10]. Однако такое оборудование пока еще исключение. Размеры детали могут быть увеличены при использовании, например, лазерной наплавки металлических порошков, но этот процесс характеризуется низкой скоростью нанесения материала из-за необходимости нанесения тонких слоев порошков и оказывается недопустимо длительным и дорогостоящим при изготовлении крупногабаритных изделий. Изначально АМ-технологии применяли для изготовления одной либо нескольких деталей для индивидуального или мелкосерийного производства. В настоящее время повышение производительности и надежности оборудования, возможность параллельной работы нескольких и даже десятков единиц установок обеспечило выход на годовой объем произ-

водства до 25000 мелких деталей. Для деталей сложной формы, с тонкими стенками и габаритов в плане, превышающих 8—10 мм, необходимо в процессе построения для избежания коробления и разрушения изделия формировать специальные вспомогательные элементы — так называемые поддержки, которые затем необходимо удалять механически от готовой детали. Несвариваемые металлы не могут быть использованы в АМ-технологии, трудно свариваемые металлы требуют определенных технологических подходов. Детали, полученные металлургическими АМ имеют тенденцию проявления анизотропии в оси Z (вертикальное направление построения детали). На прочность изделия, полученного АМ-технологией, существенно влияет остаточная пористость, которая может достигать одного процента и выше.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Технологии порошковой металлургии, которые используются в промышленном производстве уже более ста лет, обоснованно можно отнести к промышленным аддитивным технологиям. Основания для такого утверждения следующие:

- сырье порошковой металлургии, как и в металлургических аддитивных технологиях — в дисперсной форме,
- результат воздействия на дисперсное сырье давлением (формование) и температурой (спекание, ТО, ХТО) — готовое 3D-изделие конечных размеров и формы,
- повышение свойств порошкового изделия, как и продуктов аддитивных технологий, достигается за счет его доуплотнения.

Есть, тем не менее, особенности, характерные для аддитивных технологий на уровне исходного сырья — порошков. Во-первых, все литературные источники [1, 3, 4, 9—11] упоминают о сферичности или округлости частиц. Это необходимо для равномерного и быстрого заполнения порошком платформы построения в методе Bed Deposition и, соответственно, равномерной подачи порошка в методе прямого построения Direct Deposition. Требование округлости или сферичности частиц в определенной степени

напоминает технологию горячего изостатического прессования (HIP), в которой только такая форма частиц обеспечивает полное заполнение формы и получение качественной прессовки. По поводу среднего размера частиц требования расходятся и зависят от производителя соответствующего оборудования. Так, фирма Phenix Systems использует порошок с $d_{ч\text{cp}} = 10$ мкм; Concept Laser — 25...52 мкм при $d_{50} = 26.9$ мкм; Arcam рекомендует 45...100 мкм, SLM Solutions — $d_{50} = 10...30$ мкм.

В табл. 2 приведены составы и нормативные документы, определяющие основные свойства промышленных порошков для аддитивных технологий. Как видно из табл. 2, для аддитивных технологий выпускается широкая номенклатура порошков, из которых можно получать изделия различного назначения: детали авиационных и ракетных двигателей, медицинские имплантаты, конструкционные и легкие элементы машин и механизмов.

На рис. 1 представлены СЭМ-фотографии частиц порошков разных составов, используемых в аддитивных технологиях.

Специфические требования к порошкам для аддитивных технологий требуют дополнительных операций: рассева и откатки, сфероидизации в плазме и т. п., что приводит к уменьшению выхода годного, росту отходов и стоимости таких порошков.

Наблюдается дефицит порошков, связанный с бурным ростом производства и продажи машин для аддитивных технологий, который по всему миру превышает рост производства порошков для них. Для потребителей из СНГ расходные порошки для аддитивных технологий составляют еще более серьезную проблему — в основном их приходится закупать за рубежом.

В табл. 3 представлены цены на порошки для конкретной установки сплавления металлических порошков EOSINT M280, которые рекомендует производитель этой установки для гаранти-

Таблица 2. Марки, составы и нормативные документы на промышленные порошки для аддитивных технологий

Наименование	Обозначение	Стандарты ЕС	Стандарты США
Коррозионно-стойкая сталь	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L, UNS S 31603
	X5CrNiCuNb16.4	1.4542	Grade 630, UNSS17400
	X4CrNiCuNb164	1.4540	UNS S15500
Жаропрочная сталь	4Cr5MoSiV1	1.2344	AISI H13
Мартенситостареющая сталь	X3NiCoMoTi18-9-5	1.2709	18 % Ni Maraging 300 AISI H13
Инконель 625	NiCr22Mo9Nb		UNS N06625
Инконель 718	NiCr19Fe19NbMo3	ISO 6208	AMS 5662, AMS 5664
Коммерчески чистый титан	CP Ti	ISO 5832-2	UNS R50400
Титановый сплав Ti6Al4V	Ti6Al4V	ISO 5832-3	ASTM F136, ASTM F1472
Титановый сплав TiAl6Nb7	TiAl6Nb7	ISO 5832-11	ASTM F1295
Сплав кобальт-хром	CoCrMo	ISO 5832-4	ASTM F75, ASTM F1537
		ISO 5832-12	ASTM F75, ASTM F1537
Алюминиевые сплавы	AlSi12		ASTM AA4047, ASTM A04130
	AlSi10Mg		A03600
	AlSi7Mg		ASTM Al3560
	AlSi9Cu3		
	AlMg4,5Mn0,4		

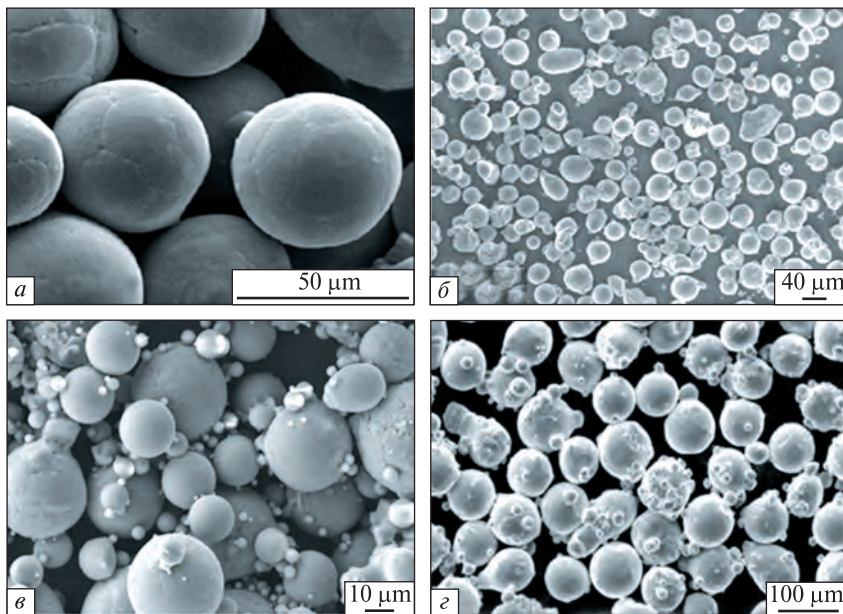


Рис. 1. СЭМ-изображения частиц порошков, применяемых в аддитивных технологиях: а — Ti-48Al-2Cr-2Nb, б — Hastelloy X, в — AlSi10Mg, з — Ni718

рованного качества получаемых на ней изделий. Цены в табл. 3 приведены на европейском рынке. Цена порошков за его пределами будет еще выше с учетом НДС, таможенных, транспортных и других платежей. Поэтому задача разработки отечественных технологий получения и доработки порошков металлов и сплавов, пригодных для использования на установках аддитивных технологий разных типов, организация производства этих порошков на территории стран, активно занимающихся освоением металлургических АМ является весьма актуальной и экономически целесообразной.

Таблица 3. Стоимость порошков для установки сплавления металлических порошков EOSINT M280

Тип порошка	Стоимость, евро за кг
Титан (BT 4)	690
Maraging Steel MS1 (мартенситно-старееющая сталь)	235
Aluminium AlSi10Mg (алюминий)	183
Stainless Steel PH1 (коррозионно-стойкая сталь)	117
Stainless Steel GP1 (коррозионно-стойкая сталь)	107

Фактически на наших глазах рождается новое высокотехнологичное направление в порошковой металлургии, и тот, кто правильно оценит ситуацию и сможет сориентироваться и найти свое место в этом процессе, просто обречен на успех.

Металлургические АМ иногда выделяют особой аббревиатурой DMF — Direct Metal Fabrication прямое «выращивание» из металлических порошков. Эту группу технологий рассматривают в качестве одной из стратегических для освоения в первую очередь в аэрокосмической и оборонной отраслях.

Ожидается, что наибольший эффект может быть получен в следующих отраслях:

- в космической индустрии — сопла, детали и узлы жидкостных ракетных двигателей,
- в самолетостроении — сложнопольные детали ГТД, компрессоров,
- в энергетическом машиностроении — фасонные изделия из высоколегированных сталей,
- в медицине, особенно в хирургии и стоматологии (создание протезов и имплантатов),
- в изготовлении инструментов для обработки пластиковых изделий и деталей, получаемых инъекционным формованием,
- в автомобильной и транспортной промышленности — детали ДВС, конструкционные детали,

• в производстве товаров народного потребления.

Перспективность АМ-технологий основывается на ряде преимуществ и дает возможность сократить на 30 % затраты, связанные с приобретением исходных материалов, но также повысить производительность труда на 25—30 %, снизить себестоимость выпуска продукции на 30 % по сравнению с ранее используемыми традиционными технологиями, например производстве форсунок газотурбинных двигателей для авиации и ракетостроения международной корпорации «Boeing» [5].

ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В БЕЛАРУСИ

Первый опыт в области селективного лазерного сплавления был получен совместно ИПМ НАНБ (Минск) и ИТА НАНБ (Витебск) в 2001—2003 гг. (рис. 2) [12].

Особенностью данной технологии являлась расфокусировка луча лазера и перемещение платформы с порошком только по оси Z. За счет этого по периферии частицы порошка припекались друг к другу, образуя пористую оболочку, а в центре — сплавливались, формируя компактный стержень. Таким образом, были получены прототипы деталей имплантатов, тем не менее, прошедшие успешную апробацию на лабораторных животных [12].

В 2002—2005 гг. ИПМ и ИФ НАНБ была создана установка селективного лазерного спекания металлических порошков, которая в большей мере напоминает современные машины (рис. 3) [2].

В данной установке процесс происходит на вертикально перемещающейся технологической платформе с порошком, размещенной в рабочей камере с защитной атмосферой аргона. Оптическая система позволяет осуществлять сканирование лазерным лучом в горизонтальной плоскости по заданной траектории, наблюдение за зоной спекания с помощью видеокамеры, контроль температуры в зоне лазерного воздействия с помощью системы контроля процесса спека-

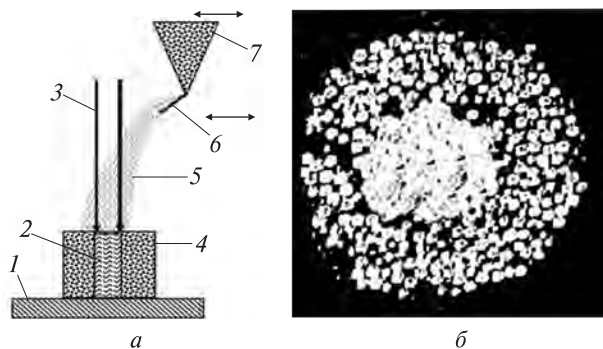


Рис. 2. Схема установки SLS, созданной в ИТА НАНБ совместно с ИПМ НАНБ (а) и микроструктура образца, полученного методом СЛС из сферического порошка титана марки ВТ1-0 на этой установке (б): 1 — опускающаяся платформа, 2 — оплавленный стержень, 3 — луч лазера, 4 — пористая оболочка, 5 — поток частиц, 6 — заслонка, 7 — бункер с порошком

ния. Подготовка виртуальной модели изделия осуществляется в системах CAD CAM PDM, поддерживающих режим твердотельного (3D-solid) моделирования. Программное управление работой установки, задание технологических режимов и их контроль в режиме реального времени осуществляется с помощью управляющего компьютера.

Технические характеристики установки селективного лазерного спекания

Длина волны лазерного излучения, мкм	1.06
Частота следования лазерных импульсов, Гц	50
Средняя мощность лазерного импульса, Вт	50
Длительность лазерного импульса, мс	3—6
Максимальные габариты изделия, мм	200 × 200 × 50
Скорость перемещения оптической системы, мм/мин	100—1000
Точность позиционирования, мкм	20
Фокусное расстояние объектива, мм	250
Диаметр фокусного пятна, мкм	200—500

В настоящее время установка, хоть и морально устарела, находится в работоспособном состоянии и позволяет демонстрировать спекание с помощью импульсно-периодического лазерного излучения единичных слоев частиц порошка по площади заданной конфигурации (рис. 4) и последующего припекания таких слоев друг к другу, а также осуществлять гравировку штам-

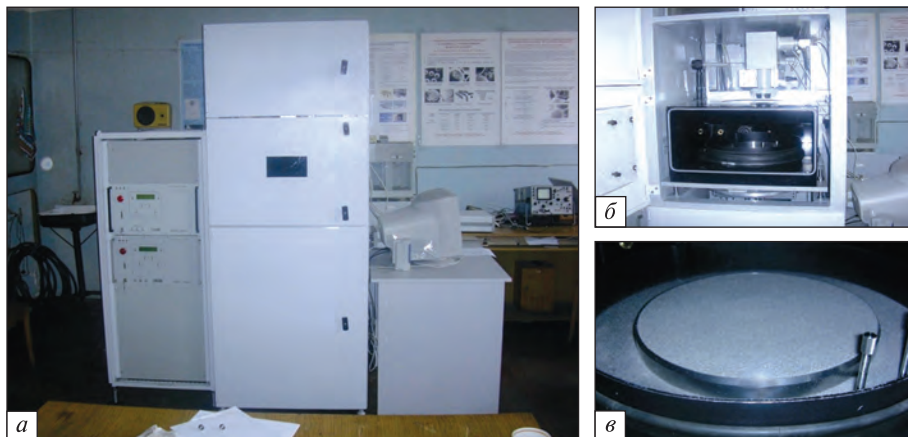


Рис. 3. Установка селективного лазерного спекания металлических порошков, созданная ИПМ и ИФ НАНБ: *а* — общий вид, *б* — рабочая камера, *в* — технологическая платформа

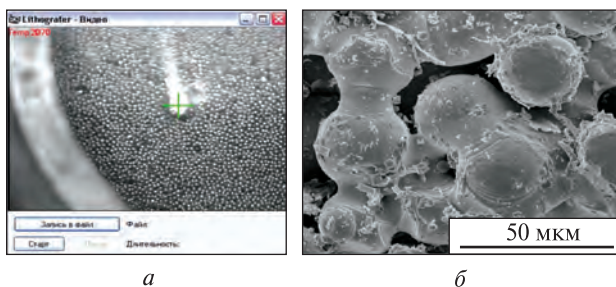


Рис. 4. Режим контроля процессом спекания порошка титана ВТ1-0 (*а*) и топограмма поверхности спекенного методом СЛС пористого проницаемого материала из порошка титана ВТ1-0 (*б*)

пов и памятных знаков, маркировку, микросварку, перфорацию и фигурную раскройку листовых материалов.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ГНУ «ИНСТИТУТ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ»

На протяжении последних трех лет ГНУ ИПМ участвует в проекте 7-й Европейской рамочной программы, где активно решается ряд важных вопросов по аддитивным металлургическим технологиям 3D печати металлических и металлокерамических порошков.

Сегодня в институте создан Научный центр специальных порошков и 3D-печати.

Учитывая имеющийся научный задел и потребности промышленности РБ можно сформулировать научные направления центра:

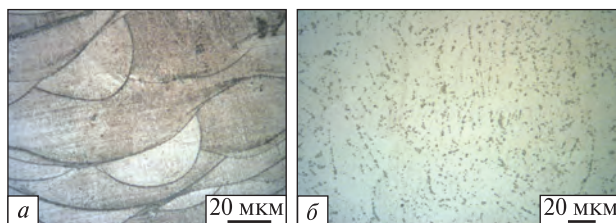


Рис. 5. Структура СЛС-образцов из порошков жаропрочного сплава IN718 до (*а*) и после (*б*) термобарической обработки

- освоение производства методом 3D-печати изделий для аэрокосмической и специальной техники;
- разработка технологий изготовления композиционных порошков заданного химического и гранулометрического состава различными методами плавки в вакууме и распыления инертным газом, механоактивированного самораспространяющегося синтеза (МАСВС), механического легирования, технологий размола и классификации порошков;
- расширение номенклатуры используемых материалов за счет разработки материалов на основе металлокерамики;
- исследование режимов спекания порошковых материалов, управления конечными свойствами и геометрией изделия с учетом размерных изменений происходящих на всех этапах технологии;
- исследование процессов последующей термической, термомеханической и термохимической

кой обработки порошковых заготовок с целью придания им требуемых эксплуатационных характеристик.

В результате исследований установлена принципиальная возможность достижение 100 % плотности для образцов из жаропрочного сплава IN718, полученных методом селективного лазерного спекания (СЛС) [8].

Важным эффектом пост-обработки, включающей горячее изостатическое прессование (ГИП) образцов, предварительно полученных методом

Таблица 4. Рабочие характеристики и программное обеспечение 3D-принтера ProX DMP 300

Характеристики	Показатели
<i>Аппаратные средства</i>	
Оптоволоконный лазер	$P = 500$ Вт, $\lambda = 1070$ нм, система управления и контроля микропроцессорная
Система наложения слоев	Регулируемая, система регулировки микропроцессорная
Объем печати	$250 \times 250 \times 300$ мм
Минимальная зона построения детали	$x = 100$ мкм, $y = 100$ мкм, $z = 20$ мкм
Повторяемость	$x = 20$ мкм, $y = 20$ мкм, $z = 20$ мкм
Система загрузки	Автоматическая, пневмомеханическая с микропроцессорной системой контроля
Система сбора и возврата порошка	То же
Расходные материалы	Нержавеющая сталь, инструментальная сталь, сплавы цветных металлов, жаропрочные сплавы, окись алюминия и титана, металлокерамика
<i>Программное обеспечение</i>	
Программные средства автоматического проектирования CAD/CAM	ProX® DMP Manufacturing
Программа управления	PX Control V2
Форматы чтения CAD	STL



Рис. 6. Установка вакуумно-индукционной плавки и распыления расплава инертным газом марки JT-QWH-25KG

селективного лазерного спекания (СЛС) является исправление характерной для СЛС структуры. В процессе ГИП из слоистой структуры (рис. 5, а) формируются зерна близкие по форме к равноосным (рис. 5, б). При этом наблюдается увеличение плотности на 3.5 %, т. е. плотность после СЛС обработки составляет 7.92 г/см³, или 96.7 %, а после дополнительной обработки ГИП плотность составляет 8.19 г/см³, или 100 %. Это немаловажно, так как подобные сплавы предназначены для работы при повышенных температурах и растягивающих нагрузках.

В институте имеется исследовательское оборудование для изучения процессов и получения порошков методом распыления, методом МАСВС (смесители, аппараты-активаторы (атриторы, планетарные, струйные и вибрмельницы), СВС-реакторы, пневмо-классификаторы различной производительности, предназначенные для выделения порошков узкой фракции.

Для исследования процессов обработки сформованных СЛС образцов имеются высокотемпературная вакуумная печь Т-22Х24-GG-2900-VM-G и установка горячего изостатического прессования AIR6-30 HOT AMERICAN ISOSTATIC PRESSEN.

В институте имеется научно-исследовательская база, необходимая для решения поставленных задач. Разработаны методики исследования и в наличии новейшее оборудование для исследований свойств порошковых композиционных материалов и изделий из них.

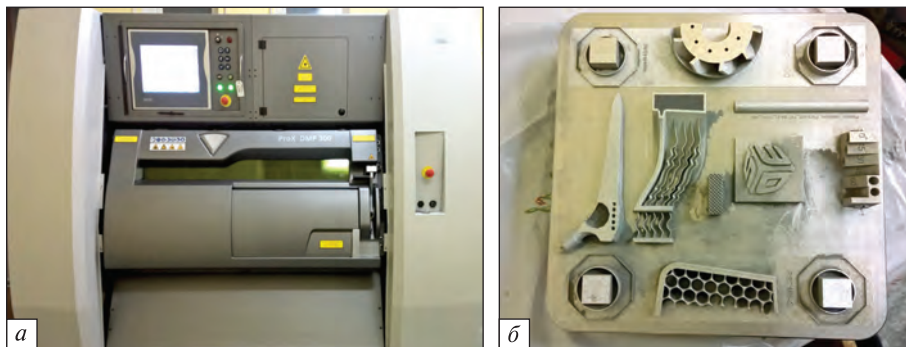


Рис. 7. Внешний вид 3D-принтера ProX DMP 300 (а), рабочая платформа принтера с образцами деталей построенных деталей (б)

Для разработки и исследования процессов получения порошков для 3D-печати в институте смонтирована и запущена в эксплуатацию установка вакуумно-индукционной плавки и распыления расплава инертным газом JT-QWH-25KG (рис. 6).

Основные технические характеристики установки JT-QWH-25KG

Объем загрузки	25 кг (для стали)
Мощность среднечастотного	
Индукционного нагревателя	100 кВт, 4 кГц
Температура в раздаточном тигле	1200—1700 °С
Рабочее давление вакуума, не более	0.66 Па
Максимальное давление	
в распылительной камере	6 МПа
Температура в плавильном тигле	≤2200 °С
Газы, используемые для распыления ...	Ar, N ₂

Для разработки и технологий изготовления и организации производства методом 3D-печати изделий для аэрокосмической и специальной техники в институте смонтирован и запущен в эксплуатацию металлургический 3D-принтер, работающий по принципу избирательного лазерного сплавления металлических порошков (рис. 7). В табл. 4 приведены основные характеристики 3D-принтера ProX DMP 300.

В результате комплекса работ планируется установить новые научные закономерности:

- формирования физико-химических свойств и гранулометрических показателей порошковых композиционных материалов для 3D-печати в процессе их получения,
- структурно-фазовых изменений в материалах в результате термомеханического воздействия на них,

- формирования геометрических параметров изделий с учетом фазовых превращений, происходящих при воздействии на них лазерным лучом,
- формирования пространственных структур и конструкций на их основе с высокими показателями удельной прочности и жесткости и с заданной внутренней 3D-архитектурой.

В результате выполнения работ будут разработаны:

- научные основы выбора технологических параметров, обеспечивающих сохранение наследственной структуры;
- технологии изготовления композиционных порошков заданного химического и гранулометрического состава методами распыления в вакууме, СВС, механического легирования;
- технологии размола, классификации и обработки порошковых материалов с целью получения узких фракций и максимально приближенных к сферической форме;
- методики исследования фазового и структурного состояния материалов на всех технологических этапах 3D-печати методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного и атомно-эмиссионного анализа;
- технологии 3D-печати изделий сложной геометрической формы из металлических, керамических и металлокерамических порошков;
- технологии термической, термомеханической и термохимической обработки предварительно полученных порошковых 3D-заготовок с целью придания им требуемых структурных и физико-механических характеристик;
- технологические рекомендации для организации промышленного производства изделий методом 3D-печати.

ВЫВОДЫ

Металлургические аддитивные технологии бурно развиваются и перешли из стадии прототипирования, выпуска экспериментальных образцов и единичных изделий к полноценному серийному промышленному производству изделий аэрокосмической и медицинской техники, автомобильного транспорта, судостроения, огнестрельного оружия и др. По мнению отдельных ученых и специалистов, в обозримом будущем эти технологии заменят традиционные технологии литья, обработки давлением и резанием. В пользу этого свидетельствует успешное применение продуктов аддитивных технологий в реальных объектах техники и организме человека, а также высокая эффективность новой технологии в конструировании — возможность замены десятков деталей, собираемых у сборочную единицу, на цельное изделие, полученное в одном производственном цикле.

Металлургические аддитивные технологии являются неразрывной частью технологий общей порошковой металлургии. В то же время к порошкам металлов и сплавов для применения в установках формирования из них трехмерных изделий производители оборудования предъявляют специфические требования, что обуславливает необходимость организации специализированных производств порошков для аддитивных технологий. В настоящее время объемы производства таких порошков не обеспечивают потребности производства изделий, что ведет к завышенной стоимости порошков, а также затягиванию сроков их поставки.

Ученые и специалисты Беларуси имеют опыт собственной разработки установок и технологий селективного лазерного спекания порошков титана и титановых сплавов, позволяющим им успешно осваивать передовое зарубежное оборудование и приступить не только к выпуску изделий, но и порошков металлов и сплавов для аддитивных технологий, разрабатывать технологические приемы повышения плотности и прочности формовок, модификации их микроструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аддитивные технологии. Информация. [Электронный ресурс]. — TorTec Ltd, 2015. — Режим доступа: <http://tornado.co.com/>
2. Белявин К. Е., Минько Д. В., Быков Р. П., Кузнецик О. О. Исследование влияния мощности импульсно-периодического лазерного излучения на устойчивость жидкометаллических контактов между частицами порошка при селективном лазерном спекании // Порошковая металлургия. — 2006. — № 29. — С. 268—272.
3. Довбыш В. М., Забеднов П. В., Зленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла [Электронный ресурс] ФГУП «НАМИ», ФГУП «Внештехника», СПбГПУ — Режим доступа: http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf.
4. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении: Пособ. для инж. — М: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. — 220 с.
5. Ильющенко А. Ф. Эффективный инструмент современного машиностроения // Наука и инновации. — 2016. — № 2. — С. 16—21.
6. Ильющенко А. Ф. Аддитивные технологии и перспективы их развития в ГНУ «Институт порошковой металлургии» // Сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. (Минск, 24 мая 2017 г.). — Минск: Беларуская навука, 2017. — С. 51—65.
7. Ильющенко А. Ф., Савич В. В. Порошковая металлургия — одна из первых аддитивных технологий // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Матер. науч.-техн. конф. (Гродно, 5—6 октября 2016 г.). — Гродно: ГрГУ, 2016. — С. 20—30.
8. Разработка и исследование процессов уплотнения порошковых дисперсно-упрочненных композиционных материалов в условиях горячего изостатического прессования (Отчет о научно-исслед. работе) / ГНУ «Институт порошковой металлургии»; Руководитель темы А. Ф. Ильющенко, исполнитель О. А. Прохоров. — Минск, 2015.
9. Степанова Е. Ю. Аддитивные технологии как прорывные инновации ресурсосбережения 21 века [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://oreluniver.ru/file/science/confs/2015/ee/publ/s_7_Stepanova_E_YU.doc.
10. Стрельникова Л. Складываем, а не вычитаем. О тонкостях аддитивных технологий. (По материалам «Публичного аналитического доклада по развитию новых производственных технологий», выпущенного Сколковским институтом науки и технологий 22 октября 2014 года) [Электронный ресурс] // Химия и жизнь. — 2014. — № 12. — Режим доступа: <https://www.hij.ru/read/articles/technologies-and-materials/5202>
11. Introduction to additive manufacturing technology. A guide for Designers and Engineers. Retrieved from <http://www.epma.com/additive-manufacturing>.
12. Tolochko N. K, Laoui T, Froyen L., et al. Dental root implants produced by the combined selective laser sintering/melting of titanium powders // J. Mater.: Design and Applications. —

2002. — 216, N 4. — P. 267—270. — (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L).

Стаття надійшла до редакції 28.08.17

REFERENCES

1. *Additivnye tekhnologii*. Informatsiya [ADDITIVE TECHNOLOGIES. Information]. — TorTec Ltd, 2015. Retrieved from <http://tornado.co.com/> [in Russian].
2. *Beliavin K. E., Minko D. V., Bykov R. P., Kuznechik O. O.* Issledovanie vliyaniya moshchnosti impulsno-periodicheskogo lazera na ustoychivost zhidkometallicheskih kontaktov mezhdou chastitsami poroschka pri selektivnom lazernom spekanii [Investigation of the effect of pulsed-periodic laser radiation on the stability of liquid metal contacts between powder particles under selective laser sintering]. *Poroschkovaya metallurgia* — Powder metallurgy, N 29, 268–272 (2006) [in Russian].
3. *Dovysh V. M., Zabednov P. V., Zlenko M. A.* Additivnye tekhnologii i izdeliya iz metalla [Additive technologies and metal products]. FGUP NAMI, FGUP Vneshtekhnika, SPbGPU. — Retrieved from http://nami.ru/uploads/docs/centr_technology_docs/55a62fc89524bAT_metall.pdf [in Russian].
4. *Zlenko M. A., Nagaicev M. V., Dovysh V. M.* (2015). Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: posobie dlya inzhenerov [Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers] — M: FGUP NAMI. [in Russian].
5. *Ilyushenko A. Ph.* Effektivnyi instrument sovremennogo mashinostroenia [Effective tool of modern engineering]. Nauka i innovacii — *Science and Innovation*, N 2, 16—21 (2016) [in Russian].
6. *Ilyushenko A. Ph.* Additivnye tekhnologii i perspektivy ikh razvitiya v Respublike Belarus [Additive technologies and prospects for their development in the State Institution "Powder Metallurgy Institute"] Proceedings from Prospects for development of additive technologies in the Republic of Belarus `17 *Mezhdunarodny nauchno-prakticheski simposium (Minsk, 24 maya 2017 hoda) - International Scientific-practical Symposium, 51—65* (Belaruskaya navuka, Minsk, 2017) [in Russian].
7. *Ilyushenko A. Ph., Savich V. V.* (Poroshkovaia metallurgia — odna iz pervykh additivnykh tekhnologii [Powder metallurgy is one of the first additive technologies]. Proceedings from Additive technologies, materials and constructions *Mezhdunarodnaia nauchno-technicheskaia konferencia (Grodno, 5-6 oktyabrya 2016 hoda) — International Scientific and Technical Conference, 20—30* (GrGU, Grodno 2016) [in Russian].
8. *Ilyushenko A. Ph., Prochorov O. A.* Razrabotka i issledovanie protsessov uplotneniya poroskovykh dispersno-uprochnennykh materialov v usloviyakh goriachego izostaticheskogo pressovania [Development and research of the processes of compaction of powder dispersibly hardened composite materials under conditions of hot isostatic pressing]: Report on research work: GNU IPM — 2015.
9. *Stepanova E. Yu.* Additivnye tekhnologii kak proryvnye innovacii resursosberezhenia 21 veka [Additive technologies as breakthrough innovations in resource saving of the 21st century]. — Retrieved from http://oreluniver.ru/file/science/confs/2015/ee/publ/s_7_Stepanova_E_YU.doc. [in Russian].
10. *Strelnikova L.* Skladyvaem, a ne vychitaem. O tonkostyakh additivnykh tekhnologii. (Po materialam «Publichnogo analiticheskogo doklada po razvitiyu novykh proizvodstvennykh tekhnologii», vypushchennogo Skolkovskim institutom nauki i tekhnoljgiyi 22 oktiabria 2014 goda) [Fold, but not subtract. On the subtleties of additive technologies. (Based on the materials of the "Public analytical report on the development of new production technologies", issued by the Skolkovo Institute of Science and Technology on October 22, 2014)]. *Chimia i jizn — Chemistry and Life*. — 2014 — №12. — Retrieved from <https://www.hij.ru/read/articles/technologies-and-materials/5202/> [in Russian].
11. *Introduction to additive manufacturing technology. A guide for Designers and Engineers.* Retrieved from <http://www.epma.com/additive-manufacturing>.
12. *Tolochko N. K., Laoui T, Froyen L., et al.* Dental root implants produced by the combined selective laser sintering/melting of titanium powders. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L. *J. Mater.: Design and Applications*, 216 (N 4) 267—270 (2002).

О. Ф. Ільющенко, В. В. Савич

Державний національний університет «Інститут порошкової металургії», Мінск, Республіка Білорусь

ІСТОРІЯ І СУЧАСНИЙ СТАН АДІТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У БІЛОРУСІ, ПОРОШКИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ДЛЯ НИХ

Представлено власне бачення авторів місця адитивних технологій в сучасному виробництві, їхнє ставлення до методів і технологій традиційної порошкової металургії, до можливостей їхнього спільного використання. Наведено результати оригінальних розробок в Республіці Білорусь на початку 21 століття установок селективного лазерного спікання порошків металів і технологій отримання з них пористих і композиційних матеріалів з порошків титану і титанових сплавів. Описано особливості установки селективного лазерного плавлення і установки отримання порошків індукційним плавленням у вакуумі з розпиленням струменя розплаву інертним газом, введені в експлуатацію в ДНУ «Інститут порошкової металургії». Запропоновано перспективні напрямки НДР і ОТР на новому обладнанні.

Ключові слова: адитивні технології, селективне лазерне спікання, селективне лазерне плавлення, гаряче ізостатичне пресування, індукційна плавка у вакуумі, розпилення струменя розплаву інертним газом.

O. F. Iliushchenko, V. V. Savich

State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute»,
Minsk, Belarus

ADDITIVE TECHNOLOGIES, POWDERS OF METALS AND ALLOYS FOR THEM. HISTORY AND CURRENT PRODUCTION STATE IN BELARUS

We review and discuss the place of additive technologies in modern production, their relation to the methods and technologies of traditional powder metallurgy, and the opportunities for their joint use. The design of units for selective laser sintering of metal powders and developments of technologies for the production of porous and composite materials from

titanium and titanium alloy powders have been conducted in the Republic of Belarus since the beginning of the 21st century. The results of the original developments are discussed. Features of a the unit for selective laser melting and the plant for powder production by vacuum induction melting with spraying of a melt jet with an inert gas are described. The units were put into operation at the Institute of Powder Metallurgy. We describe prospective directions of research and development of this equipment.

Keywords: additive technologies, selective laser sintering (SLS), selective laser melting (SLM), hot isostatic pressing (HIP), induction melting in vacuum, spraying of a melt jet with an inert gas.